

# 液压挖掘机工作装置的动力特性修改研究

杨 为<sup>1</sup>, 冯培恩<sup>2</sup>, 秦大同<sup>1</sup>

(1. 重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆 400044;

2. 浙江大学 CAD & CG 国家重点实验室, 杭州 310027)

**[摘要]** 为提高液压挖掘机工作装置动态性能的优化效率, 在该结构进行试验模态研究的基础上, 用双模态空间动力修改方法进行了动力特性修改研究, 研究表明: 质量修改对该结构的1阶、2阶固有频率和阻尼比有显著影响, 对其他阶结构动态特性的影响很小; 刚度修改对该结构1阶至5阶的固有频率和阻尼比均有明显影响, 高阶的固有频率和阻尼比对刚度的变化敏感。所得到的结论揭示了模态参数调整对液压挖掘机工作装置动力特性的影响规律, 为提高机械产品的总体质量奠定了基础。

**[关键词]** 双模态空间动力修改法; 模态; 液压挖掘机; 工作装置

**[中图分类号]** TU621 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2005)09-0030-04

## 1 前言

在结构/机械系统设计过程中, 越来越重视对系统动态特性的预测和改进, 以便尽早预防和发现可能出现的有害振动问题, 让机械产品的动态特性最优<sup>[1]</sup>。为此, 从动态特性角度出发, 设计师需要动力修改技术, 以指导或完成设计任务, 使机械产品的性能满足广义优化设计的要求<sup>[2]</sup>。

在工程实际中, 应用常规方法对机械结构的振动特性即使进行一次计算分析或动态测试, 往往也要花费可观的时间、经费和人力, 因此难以实现结构的多次修改和重分析。然而, 小修改和局部修改方法为简化重分析计算过程提供了便利, 这是因为可在不同的模态坐标下, 通过计算得到修改后的模态数据, 而不必重新做实验, 从而为复杂机械结构动态性能的优化设计提供了有用的决策<sup>[3~5]</sup>。

笔者在液压挖掘机工作装置试验模态研究的基础上, 用双模态空间动力修改法对该结构进行动力特性修改研究<sup>[6]</sup>, 得到了模态参数对该结构动态特性影响的规律, 为动态优化设计找到了捷径。

## 2 双重模态空间动力修改法

机械结构经试验模态分析后, 得到了  $n$  自由度的振动系统

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = f(t) \quad (1)$$

的  $m$  个模态, 对结构做  $x = \Phi q$  模态变换, 在方程两端前乘以  $\Phi^T$ , 并进行质量归一化 (即  $\Phi^T M \Phi = I$ ), 式 (1) 在模态坐标下运动方程可表示为

$$I\ddot{q} + 2\sigma\dot{q} + \Omega^2 q = \Phi^T f(t) \quad (2)$$

式中  $I$  为单位矩阵,  $2\sigma$  为对角模态阻尼矩阵,  $\Omega^2$  为对角模态频率矩阵。

假设对结构的刚度  $K$ 、阻尼  $C$ 、质量  $M$  的矩阵做了某种修改, 修改量分别为  $\Delta K$ ,  $\Delta C$ ,  $\Delta M$ , 物理坐标下的运动方程为

$$(M + \Delta M)\ddot{x} + (C + \Delta C)\dot{x} + (K + \Delta K)x = f(t) \quad (3)$$

对式 (3) 做同样的模态变换, 在方程两端前乘以  $\Phi^T$ , 可得

$$m\ddot{q} + c\dot{q} + kq = \Phi^T f(t) \quad (4)$$

式中  $m = I + \Phi^T \Delta M \Phi$ ,

[收稿日期] 2004-08-04; 修回日期 2005-02-02

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目 (50205026); “八六三”计划资助项目 (2001AA412110); 中国博士后科学基金资助项目 (2003033540)

[作者简介] 杨 为 (1973-), 男, 贵州遵义市人, 博士, 重庆大学副研究员

$$\begin{aligned} c &= 2\sigma + \Phi^T \Delta C \Phi, \\ k &= \Omega^2 + \Phi^T \Delta K \Phi \end{aligned} \quad (5)$$

其中  $m, c, k$  是实对称的  $m \times m$  矩阵，一般是非对角阵。 $m$  与  $c$  可通过特征值分解，从而对角化，分别对应的特征值及特征向量为  $\omega^2$  及  $W$ ，振型矩阵须质量归一化：

$$\begin{aligned} W^T m W &= I, \\ W^T k W &= \omega^2 \end{aligned} \quad (6)$$

做第二次模态空间变换，令

$$q = W\rho \quad (7)$$

修改结构在二次空间模态坐标下的方程为

$$mW\ddot{\rho} + cW\dot{\rho} + kW\rho = \Phi^T f(t) \quad (8)$$

同理，对式 (8) 两端同乘以  $W^T$ ，据式 (6) 可得

$$I\ddot{\rho} + W^T c W \dot{\rho} + \omega^2 \rho = W^T \Phi^T f(t) \quad (9)$$

式中  $W^T c W$  假设中阻尼力与惯性力（质量）、恢复力（刚度）相比是微小量，一般认为阻尼比小于或等于 10% 时，其模态接近于实模态<sup>[7]</sup>，因此阻尼修改  $\Delta C$  与质量修改  $\Delta M$  比例的线性组合可视为是对角型的。

联合两次模态空间变换，令

$$X = \varphi\rho, \varphi = \Phi W \quad (10)$$

$\varphi$  为修改后结构的模态矩阵，式 (9) 中  $\omega^2$  为修改后结构的固有频率。模态阻尼由式 (9) 中  $W^T c W$  的对角项获得。

### 3 模态试验

液压挖掘机工作装置的动力特性修改研究是在模态试验基础上进行的，图 1 所示为笔者的研究对象——液压挖掘机工作装置。试验中对测试对象共布置 107 个测点，勾勒出了被测结构的大体轮廓。选取测点 58 作为固定的激振点（见图 2），依次对各测点进行频率响应函数测试、参数识别模态试验等步骤后，得到了该结构的固有特性参数，其中 1 阶至 5 阶的固有频率、阻尼比如表 1 所示。

### 4 动力特性修改研究

在对液压挖掘机工作装置进行动力特性修改研究中，分别采用了对测点质量和刚度进行修改的方法，研究上述模态参数对液压挖掘机工作装置动态特性的影响规律。笔者所研究的动力特性修改法不局限于小修改，即除刚度修改引起特征值问题的系数非正定或质量修改引起质量矩阵奇异时等情形外，均可进行分析并得到动力特性修改的分析结

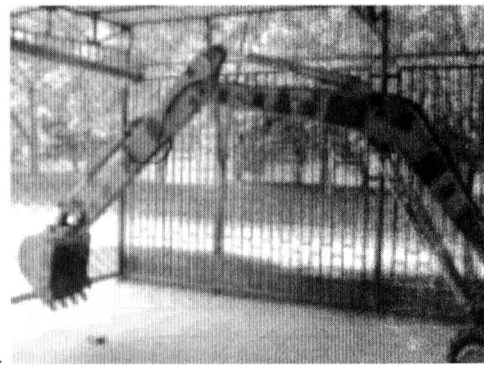


图 1 研究对象

Fig.1 Investigating object

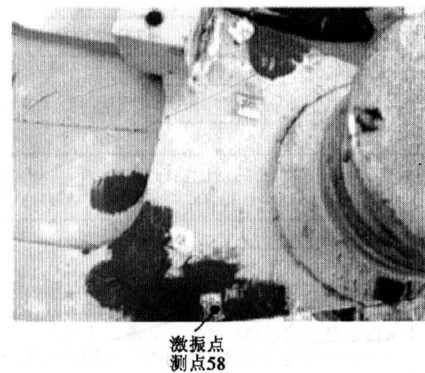


图 2 激振点位置

Fig.2 Position of excitation point

表 1 结构的 1 阶至 5 阶固有频率及阻尼比  
Table 1 First five order natural frequency and damp ratio of structure

模态阶数	固有频率/Hz	阻尼比/%
1	15.99	4.45
2	25.81	4.45
3	56.87	4.45
4	91.47	1.79
5	140.38	2.56

果。图 3 所示为结构动力特性修改的分析框图，在进行质量和刚度修改之前（图 3 所示的给定  $\Delta M$  或  $\Delta K$  流程），是对液压挖掘机工作装置进行试验模态研究的过程（即按式 (1) 和式 (2) 对结构的物理坐标进行缩减，得到  $m$  个模态坐标）。在给定质量修改量  $\Delta M$  和刚度修改量  $\Delta K$  后，用雅可比法求得式 (3) 至式 (8) 新构成的特征值问题，因研究对象的阻尼比没超过 10%，可视为小阻尼结

构，其模态可近似为实模态，计算效率将有很程度的提高，再根据式 (9) 可求得修改结构的固有频率和阻尼比，最后输出结果。

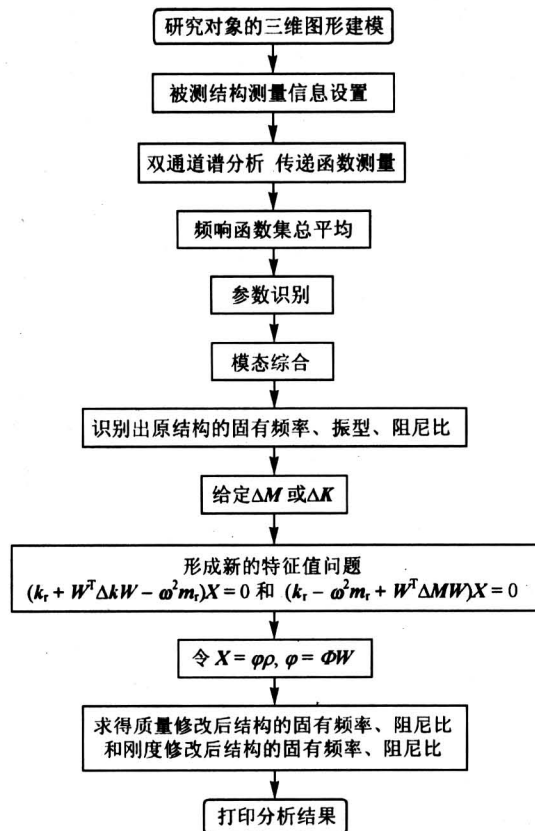


图 3 结构动力特性修改的分析框图

Fig.3 Analytical sketch of structure dynamics modification

4.1 质量修改对结构固有频率和阻尼比的影响

质量修改对结构动态特性的影响，是在离散结构的节点（测点）上按表 2 所示增减给定的修改质量（集中质量）进行分析的，计算结果见表 3。

表 2 质量修改表

Table 2 Table of modifying structure's mass

测点	修改量 ΔM/kg	测点	修改量 ΔM/kg
9	2.0	19	1.0
8	1.0	74	1.0
7	1.0	13	1.0
21	1.0	12	1.0
16	1.0	100	1.0
95	1.0	11	0.1

表 3 表明，质量修改对结构的第一阶固有频率和阻尼比有显著影响，用表 3 所示的数据进行质量修改后，原结构的固有频率由 15.99 Hz 降至 0.05

Hz，阻尼比由 4.45% 降至 0.01%。质量修改对第二阶固有频率和阻尼比也有影响，但没有对第一阶的影响明显。

表 3 质量修改后结构固有频率及阻尼比

Table 3 Natural frequency and damp ratio of modified structure

模态阶数	固有频率/Hz	阻尼比/%
1	0.05	0.01
2	23.16	4.37
3	56.87	4.45
4	91.47	1.79
5	140.38	2.57

表 3 结果还表明，质量修改对液压挖掘机工作装置高阶固有频率和阻尼比没有明显的影响。

4.2 刚度修改对结构固有频率和阻尼比的影响

刚度修改对结构动态特性的影响的思路是，假想在某两个自由度间增加一根弹簧，左右自由度分别代表弹簧的两个端点自由度，表 4 第 1 行所示的物理意义为在测点 10 和测点 96 间增加了一根刚度为 10 N/m 的弹簧。

表 4 刚度修改表

Table 4 Table of modified structure's stiffness

左自由度	右自由度	修改量 ΔK N/m
10	96	10.0
10	17	10.0
18	9	10.0
9	8	10.0
7	21	10.0
16	19	10.0
19	74	10.0
13	12	10.0
13	100	10.0
12	95	10.0

按表 4 所示的数据对结构进行刚度修改分析，得到的计算结果如表 5 所示。

结果表明，用表 4 给定的数据进行液压挖掘机工作装置刚度的修改，可显著地改变结构的固有频率和阻尼比。刚度修改使该结构的固有频率分别由 1 阶、2 阶的 15.99 Hz, 25.81 Hz 提高到 56.93 Hz 及 139.33 Hz，而对该结构的 1 阶阻尼比影响较

表5 刚度修改后结构固有频率及阻尼比

Table 5 Natural frequency and damp ratio of modified structure

模态阶数	固有频率/Hz	阻尼比/%
1	56.93	4.44
2	139.33	2.51
3	3244.31	0.05
4	52970.32	0.002
5	94276.33	0.001

小,对2阶阻尼比有一定的影响。该结构高阶的固有频率和阻尼比对表5所给的刚度值敏感。表4所做的刚度修改分别将原结构4阶,5阶的固有频率91.47 Hz, 140.38 Hz调整到52 970.32 Hz, 94 276.33 Hz,变化范围较大。

总之,刚度修改对该结构的高阶固有频率和阻尼比均有显著的影响。

## 5 结论

1) 对液压挖掘机工作装置进行质量修改,修改后该结构的1阶、2阶固有频率和阻尼比有显著变化,而对高阶固有频率和阻尼比的影响小。

2) 对液压挖掘机工作装置进行刚度修改,修改后对该结构的1阶至5阶固有频率和阻尼比均有不同程度的影响;该结构的高阶固有频率和阻尼比对于刚度的变化较敏感。

3) 对液压挖掘机工作装置进行动力特性修改研究,有助于在进行动态优化时根据优化的目标函数选择是否进行刚度修改或质量修改,以有效地提高动态优化设计效率。

## 参考文献

- [1] 吕振华. 结构动力学修改重分析方法的发展[J]. 计算结构力学及其应用, 1994, 11(1): 85~91
- [2] 冯培恩, 邱清盈, 潘双夏, 等. 机械产品的广义优化设计进程研究[J]. 中国科学(E辑), 1999, 29(4): 338~346
- [3] Snyder V W. Structural modification and modal analyses-a survey [J]. International Journal of Analytical and Experiment Modal Analysis, 1986, 1(1):45~52
- [4] 张令弥. 动态有限元模型修正技术及其在航空航天结构中的应用[J]. 强度与环境, 1994, 17(2): 01~17
- [5] Wallack P, Skoog P, Richardson M H. Comparison of analytical and experimental rib stiffener modifications to a structure [A]. The 8th IMAC Conference [C]. Orlando, Florida, 1989. 1~9
- [6] 郑万泔. CRAS动力修改原理[J]. 振动、测试与诊断, 1990, 10(1): 15~20
- [7] Wallack P, Skoog P, Richardson M H. Simultaneous structural dynamics modification (S2DM) [A]. The 7th IMAC Conference [C]. Orlando, Florida, 1988. 1~7

# Investigation on Dynamic Structural Modification of Hydraulic Excavator Work Device

Yang Wei<sup>1</sup>, Feng Peien<sup>2</sup>, Qin Datong<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. State Key Laboratory of CAD & CG, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

[Abstract] To improve dynamic performance's optimization efficiency of hydraulic excavator's work device, the dynamic modification simulation of the structure was investigated by dual modal space method based on modal analysis. The results show that the mass modification remarkably influences the first and second order natural frequency and damp ratio, and has little effect on high order modal frequency and damp ratio. The stiffness modification influences the first five modal frequency and damp ratio remarkably; high order modal frequency and damp ratio are sensitive to stiffness modification. The investigating results reveal the relationship between modal parameter modification and dynamic characteristic of the structure, and lay the foundation for improving overall quality of mechanical products.

[Key words] dual modal space method; model shape; hydraulic excavator; work device